

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 子計畫二：金屬板材深引伸成形極限之三維有限元素分析 (2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-032-001-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：李經綸

共同主持人：葉豐輝

計畫參與人員：蕭啟成, 鄧維明, 劉得仁, 溫昇泯

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 5 月 31 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

金屬成形極限之三維有限元素分析軟體開發與整合應用(2/3)--子計畫二

金屬板材深引伸成形極限之三維有限元素分析

A Study of forming limit in deep drawing process of metal sheet by the 3-D FEM analysis

計畫編號：NSC93-2212-E-032-001

執行期限：92年8月1日至95年7月31日

第 二 年：93年8月1日至94年7月31日

主 持 人：李經綸 副教授 淡江大學機械與機電工程學系  
共同主持人：葉豐輝 副教授 淡江大學機械與機電工程學系  
計畫參與人員：蕭啟成 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班  
計畫參與人員：鄧維明 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班  
計畫參與人員：劉得仁 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班  
計畫參與人員：溫昇泯 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班  
E-mail: chinglun@mail.tku.edu.tw

## 摘 要

本計畫發展出一套三維動態顯函有限元素分析程式，利用此分析程式模擬金屬板材圓杯拉伸成形製程。並設計一組模具，於油壓成形機上進行拉伸實驗，再將有限元素分析所得之結果與實驗結果作比較，以驗證本計畫所發展的三維動態顯函有限元素分析程式之可靠性。

**關鍵詞：**動態顯函有限元素、拉伸

## Abstract

This project develops a 3-D dynamic explicit finite element program to simulate the stretching process of cylindrical cup of sheet metal. A set of stretching die is designed for experiments. The experiments are set on the hydraulic forming machine to simulate the stretching process of sheet metal. The simulation and experimental results are compared to verify the reliability about the development of the 3-D dynamic explicit finite element program in this project.

**Keywords:** dynamic explicit FEM, stretching

## 一、緣由與目的

製造技術的發展重點在於建立工件的最佳生產製程，而板金拉伸成形為生產製

程之一。板金拉伸成形乃是將介於沖模與壓料板間之料片，以沖頭拉伸進入模穴，在拉伸過程中，料片所承受的拉伸負荷將隨沖頭位移增加而增加，使得料片因承受過大的周向拉應力，造成料片的厚度因變薄而產生頸縮的現象，進而發生破裂。近年來對於拉伸成形方面之相關研究頗多，如Mamalis等[1]利用顯性動態有限元素分析程式DYNA 3-D，探討四種塗層鋼板之拉伸成形，預測拉伸成形之成形極限圖(FLD, Forming Limit Diagrams)與變形圖，並與實驗結果相比較，顯示有限元素分析程式可合理的模擬實驗結果。Nandedkar與Narasimhan[2]利用平底的圓柱沖頭於四種不同的板金試片進行平面內拉伸，來探討應變歷程，應變歷程於成形極限圖之次應變為負值時顯示非線性狀態，但是在雙軸向拉伸時則近似線性狀態。Takuda等[3]利用有限元素模擬結合延性破裂準則，來預測金屬板材雙軸拉伸之極限應變，再與實驗結果相比較，顯示分析結果可合理的預測破裂處及其外緣之極限應變。Yamaguchi等[4]將鋁薄板進行雙軸拉伸實驗，並於成形製程中透過拋光程序改善工件之表面粗糙度，以有效地增加成形極限。Siegert等[5]利用CNC來控制拉伸成形實驗，並透過有限元素模擬半球形沖頭拉伸成形之製程，

以預測工件之最後性質與應變分佈。Jain等[6]利用有限元素法，來預測半球形沖頭拉伸後，再反向拉伸，並與實驗相比較，顯示半球形反向拉伸可以使應變重新均勻分佈，且可以增加半球杯拉伸之高度及降低成形極限應變。Qin等[7]控制成形之相關參數，以探討理想的深引伸成形與拉伸成形，於理想的拉伸成形製程，因雙軸向拉伸的影響，使料片可以更均勻的薄化；而於理想的深引伸成形時，在忽略整體厚度變化的情況下，使引伸凸緣可以順利的流入沖模之模穴中。Lim等[8]於探討金屬板材之成形性時，發現深引伸之杯高的極限值，主要是由料片的大小來決定；而拉伸成形主要取決於料片薄化的情形，來獲得最大的杯高，成形時拉伸與深引伸會相互影響，可由X因子之極限杯高曲線對杯高平面，來提供模具設計者選擇與料片大小、模具輪廓，及挾持負荷有關之最佳化成形條件。Worswick與Finn[9]利用動態顯函有限元素法，結合二次與非二次式的降伏準則，分析方形料片與圓形料片之孔凸緣拉伸成形，並分別進行一般的孔凸緣拉伸成形及Z形凸緣拉伸成形，顯示Z形凸緣拉伸成形比一般的孔凸緣拉伸成形，較易發生頸縮不穩定性。Takuda等[10]以有限元素結合延性破裂準則，分別探討鋁板與鋼板之軸對稱深引伸成形，並預測工件之破裂處及成形極限。

此外，有限元素軟體已經能將板金成形過程完整模擬，利用電腦輔助工程預估成形工件之外型。然而在三維板金成形的有限元素分析時，因接觸判斷之複雜，這時若使用隱性解法將會因為收斂性問題而耗費大量的計算時間，但顯性動態解法並沒有Newton-Raphson的疊代收斂問題，將可縮短求解時間。因此本計畫採用顯性動態有限元素法，結合材料彈塑性理論，發展出一套增量型彈塑性大變形之三維顯性動態有限元素分析程式。並以此分析程式，分析圓杯拉伸成形製程，於本年度設計一組圓柱形沖頭來進行圓杯拉伸之實驗，以控制沖頭衝程的方式，來觀察其破裂發生的歷程。在拉伸過程中，圓杯底部

之周緣會受到最大拉伸應力，此拉伸應力會使得周緣的厚度分佈明顯的變薄。

## 二、基本理論

### 2.1 動態顯函有限元素方程式

動態顯函有限元素法中，考慮包含內力、體積力、慣性力及接觸力之動量虛功原理方程式，可描述如下

$$\int_V \rho \ddot{u}_i \delta \dot{u}_i dV + \int_V c \dot{u}_i \delta \dot{u}_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta \dot{u}_{i,j} dV = \int_V \rho b_i \delta \dot{u}_i dV + \int_{S_i} \bar{t}_i \delta \dot{u}_i dS \quad (1)$$

式中  $\sigma_{ij}$  為Cauchy應力， $V$  為體積， $S$  為表面積， $\rho \ddot{u}_i$  為慣性力， $c \dot{u}_i$  為阻尼力， $\bar{t}_i$  為表面力或接觸力。

將(1)式有限元素離散化後，在忽略體積力的情況下可得

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + F = P \quad (2)$$

$$\text{其中 } M = \sum \int_V \rho N^T N dV \quad (3)$$

$$C = \sum \int_V c N^T N dV \quad (4)$$

$$F = \sum \int_V B^T \sigma dV \quad (5)$$

$$P = \sum \int_S N^T \bar{t} dS \quad (6)$$

式中  $M$  為質量矩陣， $C$  為阻尼矩陣， $F$  為節點內力向量， $P$  為節點外力向量， $N$  為形狀函數。欲求得時間  $t + \Delta t$  時之解，可將速度  $\dot{u}$  與加速度  $\ddot{u}$  分別利用位移  $u$  對時間  $t$  的中央差分法表示如下

$$\dot{u} = (u^{t+\Delta t} - u^{t-\Delta t}) / 2\Delta t \quad (10)$$

$$\ddot{u} = (u^{t+\Delta t} - 2u^t + u^{t-\Delta t}) / \Delta t^2 \quad (11)$$

其中  $\Delta t$  取決於

$$\Delta t_{cr} = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}} \quad (12)$$

式中  $L_e$  為特徵長度， $E$  為材料之楊氏係數， $\nu$  為浦松氏比，因此，若能維持分析之正確性，可酌量的放大質量密度因子，或加快速度因子，以減少分析所需時間，為動態顯函有限元素法之最大優點。

## 三、實驗與數值模擬分析

圖(一)為本計畫所建立之實驗設備的整體系統配置圖，包含一部五十噸的液壓板金成形機、iNet-100HC資料擷取盒、個人電腦及AlphaServer DS20E system伺服器

器。其中個人電腦中包含Labview圖控式資料擷取軟體和iNet-200資料擷取卡。其操作原理如下所述：

1. 將主壓缸與緩衝缸之負載感測器的輸出線路連接到iNet-100HC資料擷取盒，可將主壓缸與緩衝缸之壓力的類比訊號轉換為數位訊號透過iNet-200資料擷取卡輸入個人電腦。
2. 主壓缸與緩衝缸之位移可藉由光學尺的線路，透過電纜線連接於個人電腦的RS-232埠位，以便即時記錄主壓缸與緩衝缸之位移變化。
3. 主壓缸與緩衝缸之負載與位移輸出數據，皆可透過圖控式資料擷取軟體即時顯示，並記錄於個人電腦的檔案中。
4. 將所有實驗數據透過網路傳輸至伺服器上，可進行實驗數據與有限元素法數值分析結果之比較。

為驗證有限元素模擬及電腦程式的可靠性，故於液壓板金成形機上完成圓杯拉伸成形實驗，藉以比較實驗與數值分析的結果。圓杯拉伸成形實驗的模具配置如圖(二)所示，模具之幾何尺寸如圖(三)所示，而實驗的主要程序敘述如下：

1. 先以線切割機裁出直徑140mm的料片，並於電子顯微鏡上觀察料片之金相組織，以了解金屬板片在軋軋時的壓延方向。
2. 將模具安裝於液壓成形機上，並以厚薄規量測沖頭與沖模間隙，以確認模具軸線同心。
3. 將料片置於壓料板上，並以游標卡尺確認料片中心置於沖頭軸心點上。
4. 壓料板上升，並保持緩衝缸總負荷為14.4噸。
5. 執行圖控式資料擷取軟體，並使主壓缸以1.2mm/sec的平均速率下壓使料片拉伸成形或開始破裂為止。
6. 固定以140mm直徑之料片做實驗，以控制沖頭衝程的方式，來觀察工件發生破裂的情況。
7. 經由個人電腦及iNet-100HC資料擷取盒記錄主壓缸與緩衝缸之行程與負載的關

係。

8. 取下成形工件，並標示實驗編號。
9. 設定沖頭衝程由10mm開始實驗，而後以5mm的增量大小逐步加大，直到料片被拉伸破料為止。當沖頭衝程漸增導致破裂時，再從破裂之衝程，增加或減少沖頭衝程1mm，再做實驗直到同時出現兩個未破裂或再出現連續兩個破裂為止。將不同的沖頭衝程設定重複實驗步驟1至8。
10. 使用量床量測工件之幾何外形尺寸。
11. 使用CNC線切割機將工件切割，並量測工件厚度變化之資料。

實驗所用的料片是由中國鋼鐵股份有限公司所提供的JIS G3141 SPCEN-SD (DDQ)，並進行料片的拉伸實驗，以獲取材料之參數，再利用最小平方法求得鋼板之應力—應變特性曲線方程式：

$$\bar{\sigma} = 452.00(0.00738 + \bar{\epsilon}_p)^{0.2295} \text{ MPa}$$

其餘材料參數如下所示：

料片原始厚度： $t = 0.8\text{mm}$

降伏應力： $\sigma_y = 148.5\text{MPa}$

楊氏係數： $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$

柏以松比： $\nu = 0.3$

利用本計畫所發展之三維動態顯性有限元素程式分析圓杯拉伸成形。分析時前處理部份是以I-DEAS軟體依照模具尺寸，建構出三維實體模型，而在分析時，由於模具為對稱關係，因此所有模具僅擷取四分之一來作分析，以節省運算時間。料片直徑為140mm，網格分割是採用八節點實體元素，在網格分割後，節點總數為936個，元素總數為208個，圖(四)所示為料片之網格分割及邊界條件設定，圖中雙箭號為旋轉拘束，單箭號為位移拘束，三箭號為完全拘束，在X軸上的節點為X和Z方向旋轉拘束，Y方向為位移拘束，而Y軸上的節點為Y和Z方向旋轉拘束，X方向為位移拘束，在料片之外緣輪廓則是XYZ軸都完全拘束，將上述資料輸入有限元素分析程式中進行數值計算，待分析結束後再將結果匯入I-DEAS軟體作後處理的輸出。

#### 四、結果與討論

為了瞭解料片在拉伸過程中之沖頭負荷與沖頭衝程之關係、拉伸過程中料片厚度之分佈，及達到成形極限的臨界衝程，本文設計一組圓柱形沖頭進行圓杯拉伸之實驗，同時採用拉伸試驗的破斷面厚度，來作為拉伸成形極限之參考依據。

圖(五)顯示圓杯拉伸成形實驗之沖頭負荷與衝程關係，由實驗結果得知，當沖頭衝程達10mm時，工件尚未發生頸縮的現象；當沖頭衝程達14.09mm時，工件開始發生頸縮；而當沖頭衝程達14.91mm時，由沖頭負荷急速下降的趨勢，可預測工件已發生破裂之現象。

圖(六)顯示工件之變形歷程圖，圖中(a)、(b)、(c)及(d)分別代表初始料片、沖頭衝程達13mm、14.3mm，及15.17mm之工件變形圖。從圖中可以看出，隨著沖頭衝程的增加，料片被逐漸的拉伸成形，直到破裂發生為止。

照片(一)為圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達13mm之成形工件，可順利成形且無頸縮與破裂現象發生；照片(二)為圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達14.6mm時發生頸縮之工件；照片(三)為圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達15.17mm時發生破裂之工件。

#### 五、結論

本計畫已如期完成實驗設備與量測儀器之安裝與測試，及資料擷取設備軟體與硬體之更新，並設計與製作一組拉伸成形模具，於液壓成形機上進行實驗，且提供其他子計畫進行相關實驗。本計畫亦完成拉伸成形之三維動態顯函有限元素分析與實驗之沖頭負載與衝程關係及破裂起始位置之比較，故可驗證本整合計畫所發展之程式可確實預測板金之拉伸成形極限。然而對於破裂曲線之進行路徑仍需進一步的驗證，因此下個年度的計畫，將針對非軸對稱的模具進行實驗驗證，以改善本程式之功能性與可靠性，以期本程式能達泛用型之金屬成形極限三維有限元素分析軟體之目標。

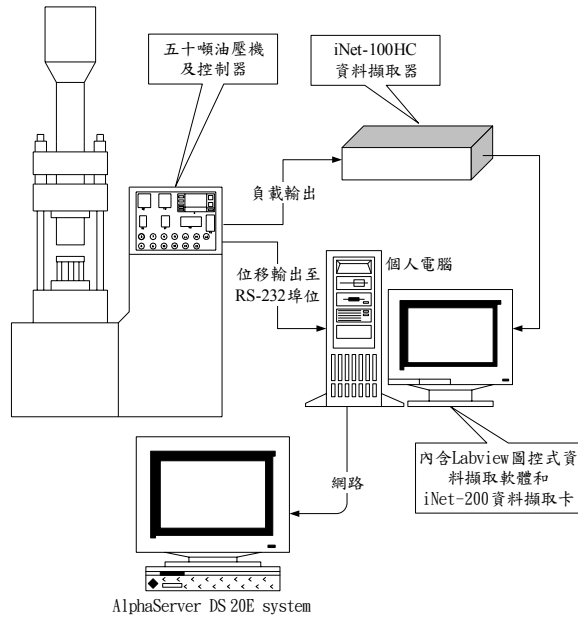
#### 六、參考文獻

- [1] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos and A.K. Baldoukas, "Finite-element modelling of the stretch forming of coated steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.68, pp.71-75 (1997).
- [2] Nandedkar, V.M. and K. Narasimhan, "Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.89-90, pp.24-29 (1999).
- [3] Takuda, H., K. Mori, N. Takakura and K. Yamaguchi, "Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.42, pp.785-798 (2000).
- [4] Yamaguchi, K., N. Takakura and S. Imatani, "Increase in forming limit of sheet metals by removal of surface roughening with plastic strain," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.48, pp.27-34 (1995).
- [5] Siegert, K., A. Renner and K.-J. Fann, "Prediction of the final part properties in sheet metal forming by CNC-controlled stretch forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.71, pp.141-146 (1997).
- [6] Jain, M., J. Allin, X. Duan and D.J. Lloyd, "Effect of reverse dome stretching on dome height and forming limits of sheet materials," *Materials Science and Engineering A*, Vol.390, pp.210-216 (2005).
- [7] Qin, S., H.M. Shang, C.J. Tay and J. Mo, "Stretching during axisymmetrical forming of sheet metal," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.63, pp.117-122 (1997).
- [8] Lim, T.C., S. Ramakrishna and H.M. Shang, "Simultaneous stretch forming and deep drawing in axisymmetrical sheet forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.97, pp.82-87 (2000).
- [9] Worswick, M.J. and M.J. Finn, "The numerical simulation of stretch flange forming," *International Journal of*

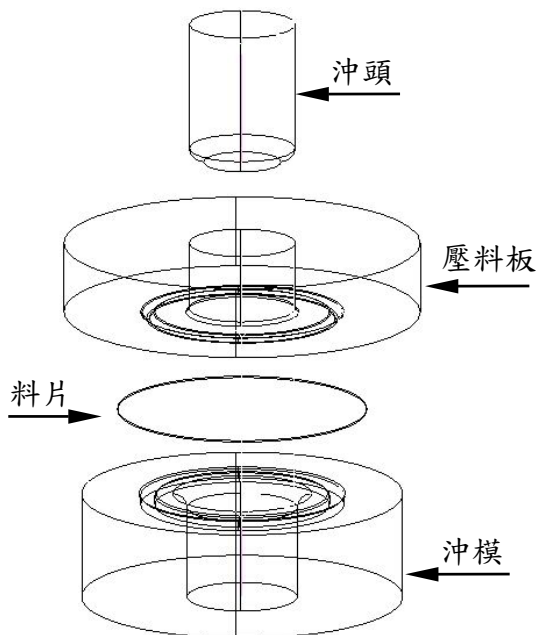
*Plasticity*, Vol.16, pp.701-720 (2000).

- [10] Takuda, H., K. Mori and N. Hatta, "The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.95, pp.116-121 (1999).

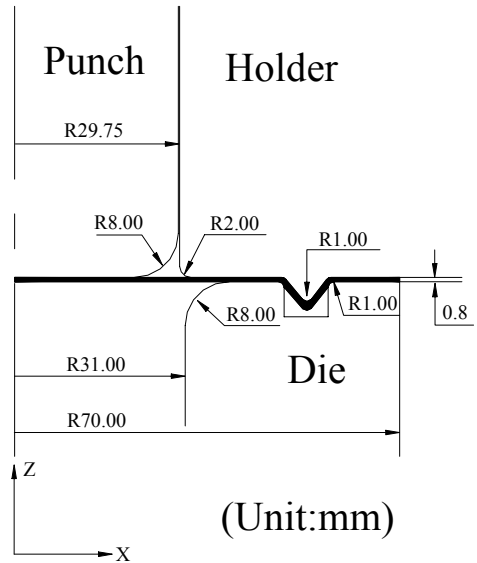
圖 表



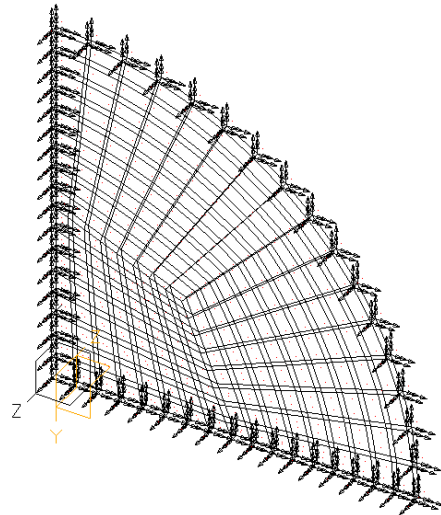
圖(一) 實驗設備之整體系統配置圖



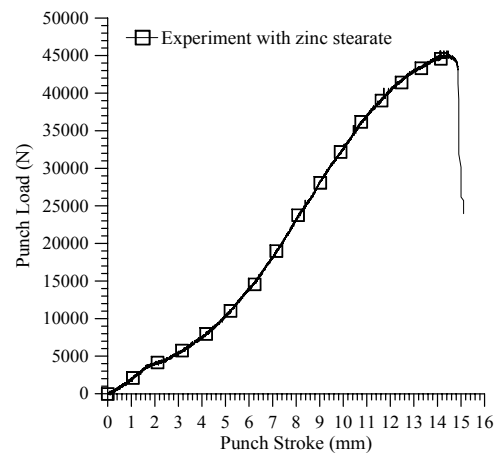
圖(二) 圓杯拉伸成形的模具配置圖



圖(三) 圓杯拉伸成形之模具幾何尺寸

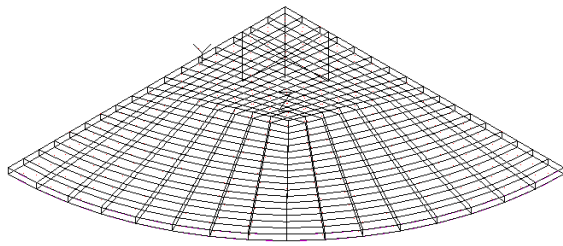


圖(四) 圓杯拉伸成形模擬之四分之一料片及邊界條件

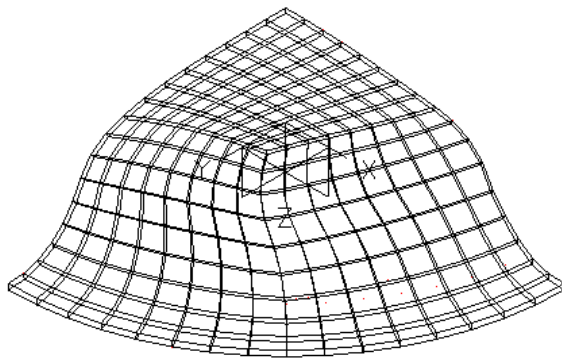


圖(五) 圓杯拉伸成形實驗之沖頭負荷與衝程關係之比較

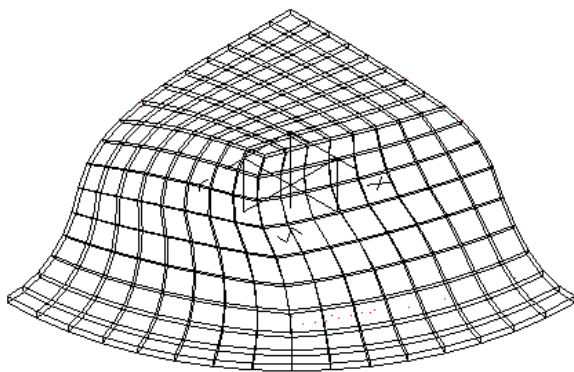




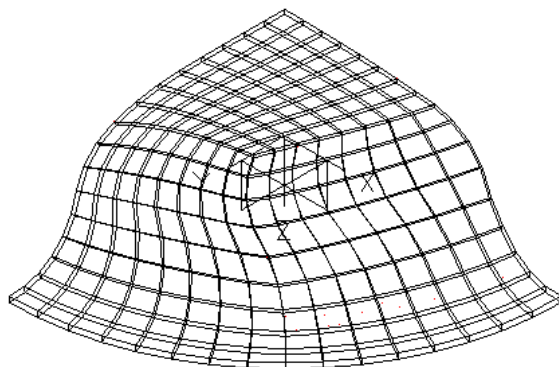
(a) 初始料片



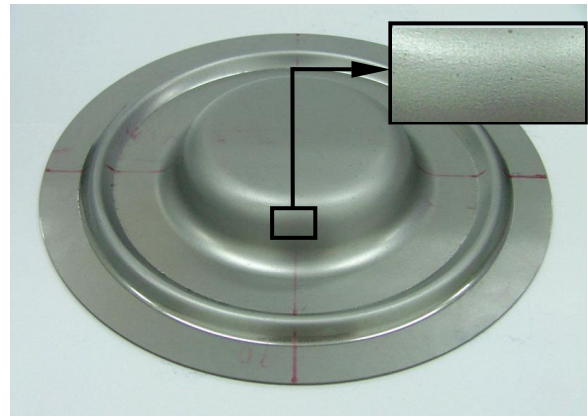
(b) 沖頭衝程達13mm之工件變形圖



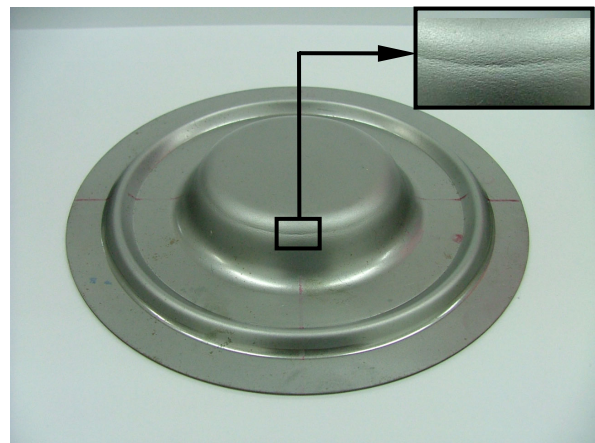
(c) 沖頭衝程達14.3mm之工件變形圖



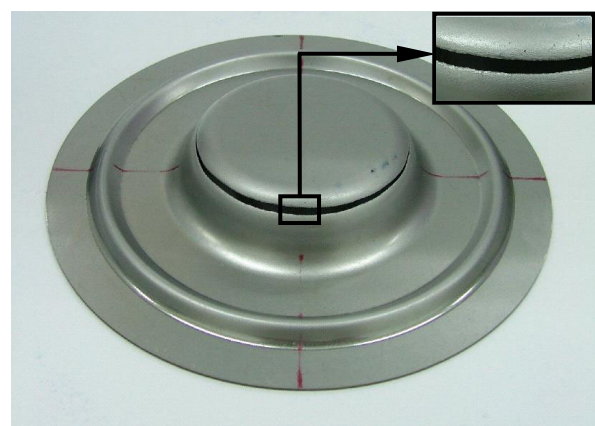
(d) 沖頭衝程達15.17mm之工件變形圖  
圖(六) 圓杯拉伸成形之工件變形歷程圖



照片(一) 圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達13mm之成形工件



照片(二) 圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達14.6mm發生頸縮之工件



照片(三) 圓杯拉伸成形實驗於沖頭衝程達15.17mm發生破裂之工件